

틸팅 인덱스 테이블 구조해석 및 최적형상 설계에 관한 연구

A Study on Structural Analysis and Optimum Shape Design of Tilting Index Table

이문재¹, 이춘만^{2,✉}
Mun Jae Lee¹ and Choon Man Lee^{2,✉}

¹ 창원대학교 기계설계공학과 (Department of Mechanical Design, Changwon Univ.)

² 창원대학교 메카트로닉스공학부 (Department of Mechatronics, Changwon Univ.)

✉ Corresponding author: cmlee@changwon.ac.kr, Tel: 055-213-3622

Manuscript received: 2009.10.19 / Accepted: 2009.10.27

The tilting index table has attached to CNC machining center with 3axes, it can be improvement of its performance and its machining efficiency. The tilting index table is a key unit in order to manufacture some non-rotational and 3-dimensional parts, using the conventional machining center. In this study, structural analysis is carried out by FEM simulation using the commercial software ANSYS Workbench 11 to develop tilting index table using direct drive motor. The shape of the tilting index table obtained from the optimization was analyzed and compared with the initial model. Also, the initial model was modified based on the optimization model and the result was verified to have the acceptable improvement.

Key Words: Tilting Index Table (틸팅 인덱스 테이블), Optimum Shape Design (최적 형상 설계), Structural Analysis (구조 해석), Redesign Model (재해석 모델)

1. 서론

틸팅 인덱스 테이블은 CNC 공작기계에 설치하여 회전축과 경사축을 부가시킴으로써 가공의 효율을 향상시키고, 비대칭형상이나 복잡한 3 차원 형상을 가공할 수 있는 정밀기계장치이다.

기존에 3 차원 형상이나 터빈 블레이드와 같은 복잡한 형상의 제품을 가공하기 위해서는 4 축 또는 5 축 공작기계가 필요하다. 이러한 공작기계를 사용할 경우 고가의 비용이 요구되기 때문에 제품 생산비용이 높아 경쟁력이 없었으나, 고정도 틸팅 인덱스 테이블을 부착함으로써 저가로 고정도의 제품 가공을 실현할 수 있다. 기존의 틸팅 인덱스 테이블은 워엄기어, 하모닉 드라이버와 같은 감속기에 의해 고 토크를 얻는 방식으로 개발이 진행되었다. 하지만 워엄기어를 적용한 감속메커니즘

은 기계적 백래쉬나 저장성에 따른 토크 손실 및 위치에러, 소음발생 등에 의해 제어정밀도가 저하되고, 마모나 윤활에 대한 유지보수의 문제점을 지니고 있다.¹ 이에 최근에는 유지보수가 필요없으며 고정도화 및 경량화, 소형화에 초점을 맞추어 DD 모터(Direct drive motor)방식을 적용한 틸팅 인덱스 테이블이 실용화되고 있다.²

본 연구에서는 DD 모터 방식을 적용한 틸팅 인덱스 테이블의 구조해석을 실시하고 구조물의 응력분포를 분석하여 고정도화 및 경량화를 위한 형상 최적화를 수행하였다. 또한 최적화된 형상에 대하여 같은 구속조건과 하중조건을 부여하여 구조해석을 실시한 후 구조적 타당성을 검토해 본다.³

2. 틸팅 인덱스 테이블의 기본 설계

DD 모터 방식을 적용한 틸팅 인덱스 테이블의 개발 사양은 하중 적재 능력 200kgf, A 축 최대 회전각 150° (+30° to -120°), C 축 최대 회전각 360° 이며 A 축과 C 축의 최고 회전 능력은 각각 100rpm, 250rpm 이다. Fig. 1 은 DD 모터 방식을 적용한 틸팅 인덱스 테이블의 2 차원 도면을 나타낸다.

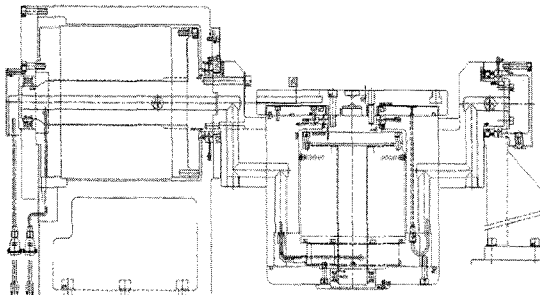


Fig. 1 Drawing of the tilting index table

Fig. 2 는 DD 모터를 적용한 틸팅 인덱스 테이블의 구성도를 나타낸다. 2 차원 도면을 바탕으로 CATIA V5 R17 을 사용하여 3 차원 모델링하였다.

A 축과 C 축 두 개의 회전축을 가지며 각각 샤프트(Shaft)와 인덱스 바디(Index body)로 구성되어 있다. C 축 인덱스 바디 상단은 가공물을 고정하는 테이블(Table)이 있다. 그 외에 C 축 인덱스 바디를 지지하는 스톡 테일(Stock tail)과 틸팅 인덱스 테이블의 바닥면 플레이트(Plate)로 구성되어 있다.

3 차원 모델링을 바탕으로 CATIA DMU(Digital mock-up)를 이용하여 각 파트(Part)간 간섭 체크를 수행하였다. DMU 는 설계상의 문제점을 미리 파악할 수 있어 전체적인 설계의 재검토에 사용된다.⁴ Fig. 3 은 어셈블(Assemble)된 모델의 간섭 검증으로

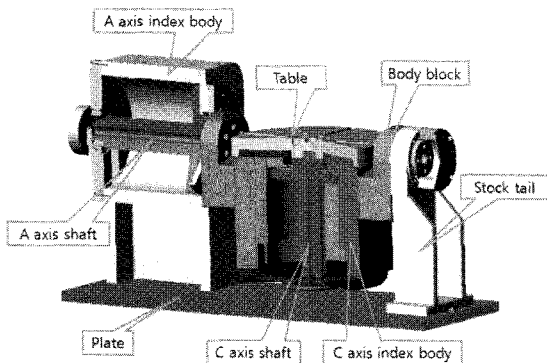


Fig. 2 3-D model of the tilting index table

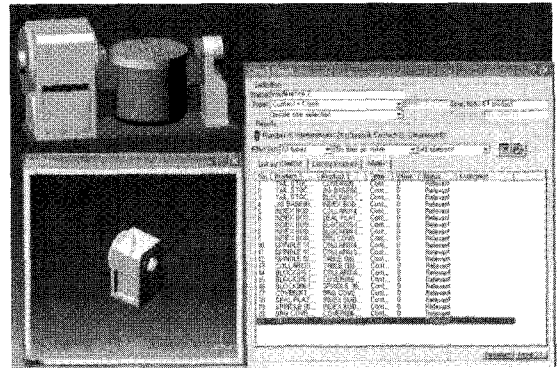


Fig. 3 Interference verification of 3-D model

서 간섭 체크 결과 각 파트간의 간섭은 일어나지 않았다. 이를 통해 기본 설계안이 올바르게 작성됐음을 확인할 수 있다.

3. 구조해석

3.1 유한요소모델

틸팅 인덱스 테이블의 구조해석을 위해 육면체 메쉬(Hex dominant method)를 적용하였으며 Fig. 4 는 141,272 개의 노드와 397,087 개의 요소수를 가지는 유한요소모델을 나타낸다.

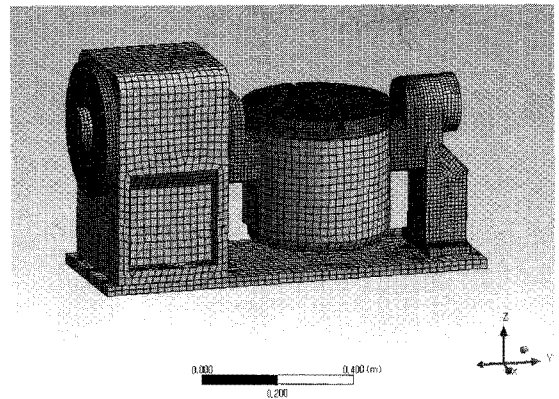


Fig. 4 Finite element model of the tilting index table

인덱스 테이블 내의 DD 모터는 해석시간을 단축시키기 위해 모터 형상 대신 질량점(Point mass)의 조건을 적용함으로써 중량은 고려하되 형상은 간소화하였다. Fig. 5 는 CATIA Measure inertia 를 이용하여 찾은 DD 모터의 무게중심을 나타낸다.

경계조건으로 틸팅 인덱스 테이블과 머시닝 센터가 결합되는 인덱스 테이블의 바닥면 16 개의

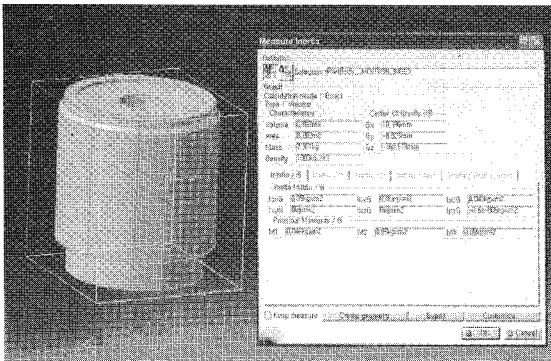


Fig. 5 Center of mass for DD motor

볼트 결합부에 회전과 이동이 없도록 구속 조건을 적용하였다. 하중조건은 틸팅 인덱스 테이블의 자중을 고려하여 구조물 전체에 중력(Gravity force)을 적용하였다. 또한 틸팅 인덱스 테이블이 최대 적재 중량 200kgf의 하중을 받는다고 가정하고 테이블과 공작물이 결합되는 지점인 테이블 부 중심 결합위치에 500N 부터 2,000N 까지 500N 단위로 각각의 하중을 적용하였다. 해석에 사용된 재료의 물성치는 Table 1 과 같다.

Table 1 Material properties of the tilting index table

| Material | SM45C | GC25 | SB41P | AL |
|------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Young's modulus [GPa] | 208 | 108 | 200 | 68.2 |
| Density [kg/m ³] | 7,817 | 7,150 | 7,850 | 2,700 |
| Poisson's ratio | 0.28 | 0.35 | 0.26 | 0.33 |

3.2 틸팅 인덱스 테이블의 정적 구조해석

구축된 유한요소모델을 바탕으로 구조해석을 수행하였다. Fig. 6 은 공작물과 테이블 결합부에 2,000N 의 하중이 가해졌을 때의 변형량(Total deformation)분포를 나타낸다. 최대 변형량은 5.14 μm로 테이블 중심 스피들 부분에서 전체적으로 발생했다.

A 축 인덱스 바디(A axis index body)에 비해 스톡 테일(Stock tail) 상단에서 더 큰 변형이 발생하는 것은 A 축 인덱스 바디와 스톡 테일의 대칭이 맞지 않아 테이블에 가해진 하중에 의한 모멘트(Moment)차이에 의해 발생한 것으로 판단된다.

Fig. 7 은 von-Mises 응력 분포를 나타낸다. 최대 응력은 5.76MPa 로써 A 축 인덱스 바디와 플레이트

트(Plate)가 결합되는 바닥면 부근에서 발생했다.

바닥면 플레이트의 항복강도 230MPa 을 고려할 때 최대응력에 대한 안전율은 40 으로 안전한 구조임을 알 수 있다.

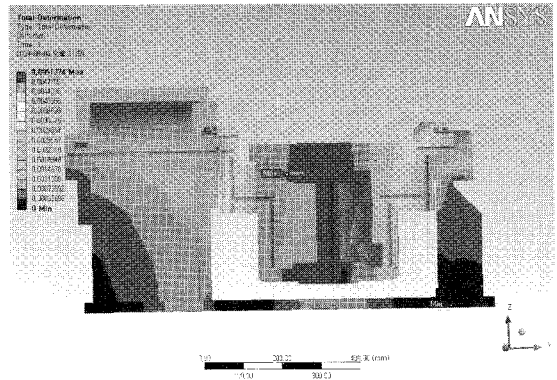


Fig. 6 Deformation distribution of the tilting index table

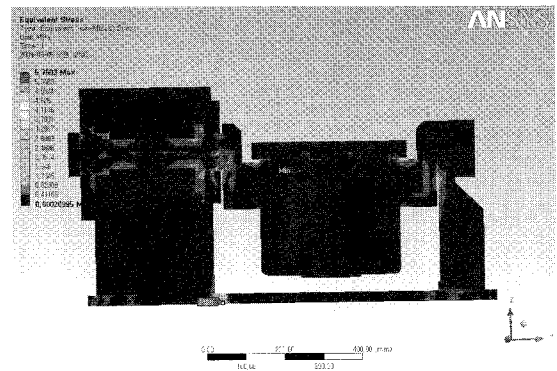


Fig. 7 Stress distribution of the tilting index table

Fig. 8 은 틸팅 인덱스 테이블의 적재 중량 50kgf 에서부터 200kgf 까지 하중 적재 시 각각의 최대 변형량과 최대 응력 그래프를 나타낸다.

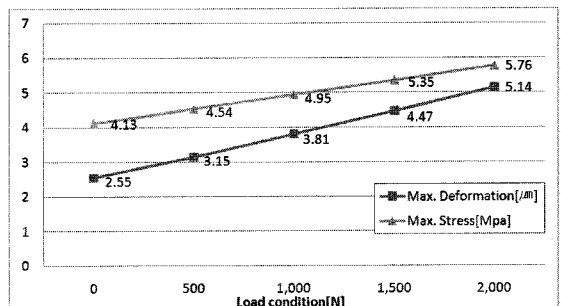


Fig. 8 Deformation and stress of each load condition

틸팅 인덱스 테이블의 A 축 최대 회전 능력 150° (+30° to -120°)를 고려하여 0° 에서 120° 까지 30° 간격으로 틸팅각을 조절하여 정적 구조해석을 수행하였다.

Fig. 9 는 틸팅각에 따른 틸팅 인덱스 테이블의 응력분포를 나타낸다. 틸팅각이 30° 에서부터 120° 까지 커질수록 스톡 테일(Stock tail)부근의 응력이 증가하며 응력분포가 넓어짐을 알 수 있다.

반면 A 축 DD 모터를 지지하고 있는 인덱스

바디는 응력분포의 변화가 없으며, 최대 응력은 틸팅 회전이 없을 때와 마찬가지로 A 축 인덱스 바디와 플레이트가 결합되는 바닥면 부근에서 발생했다. Fig. 10 은 틸팅각에 따른 틸팅 인덱스 테이블의 최대 변형량과 최대 응력 그래프를 나타낸다.

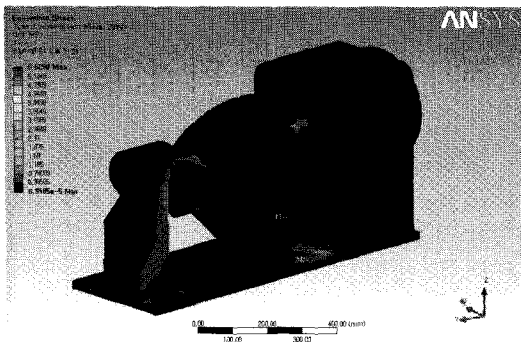


Fig. 9(a) Stress distribution of 60 degree

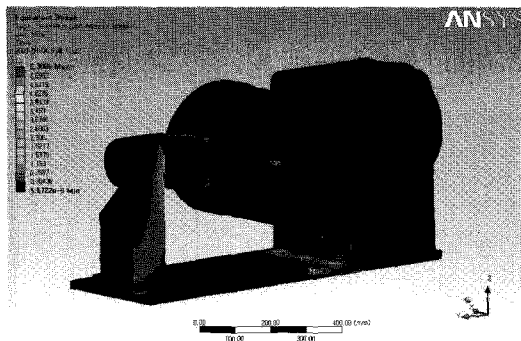


Fig. 9(b) Stress distribution of 90 degree

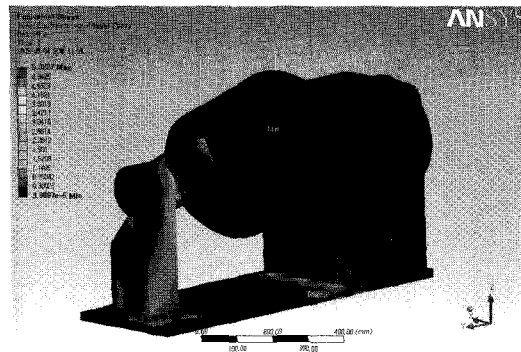


Fig. 9(c) Stress distribution of 120 degree

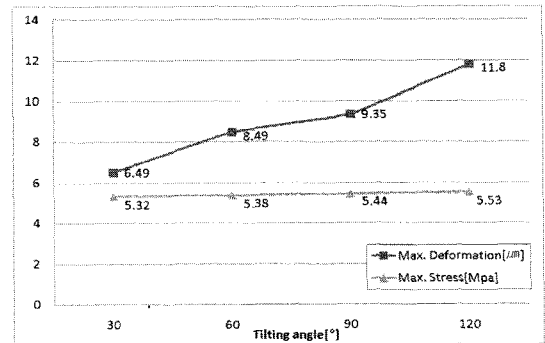


Fig. 10 Deformation and stress for each tilting angle

4. 틸팅 인덱스 테이블의 최적설계

4.1 테이블의 최적설계

최적설계란 설계사양을 수학적 모델로 구성하고 이를 수학적인 방식으로 설계치를 구하는 자동화 설계 기법이다.⁵

틸팅 인덱스 테이블의 주요 부품인 테이블은 가공물과 직접적으로 연결되는 부분이다. 테이블의 처짐이 증가한다면 가공물에 직접적인 영향을 미침과 동시에 오차의 양이 증가하게 되므로 원하는 가공 정밀도를 얻는 것은 불가능하게 된다. 특히 고속가공의 경우 스펀들의 고속 회전 및 테이블의 급속 이송이 요구되기 때문에 테이블 처짐을 고려한 강성이 충분히 고려되어야 한다. 테이블의 처짐량 감소를 위해 테이블의 변형이 최소가 되는 최적 형상 해석을 수행하였다. Fig. 11 은 테이블의 설계변수를 나타낸다.

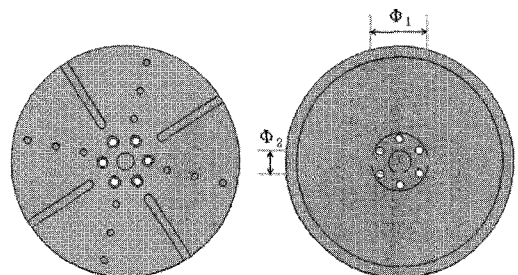


Fig. 11 Design variables of the table

치수 및 형상 최적 설계에 대한 일반적인 정식화는 목적함수 및 제한 조건 함수를 정의함으로써 표시할 수 있다. 톨팅 인덱스 테이블의 테이블에 대한 최적설계를 위하여 다음과 같은 정식화를 이용하였다.^{6,7}

Find X
 Minimize deformation (X)
 Subject to $\sigma \leq \sigma_{all}$
 $\delta \leq \delta_{all}$
 $\Phi_L \leq \Phi_1, \Phi_2 \leq \Phi_U$
 $X=[\Phi_1, \Phi_2]$

여기서 X는 설계변수, 그리고 σ, δ 는 각각 응력과 변위를 의미한다. $\sigma_{all}, \delta_{all}$ 은 응력, 변위에 대한 허용 값을 표시한다. Φ_1, Φ_2 는 각각 테이블 지지대의 바깥지름, 안지름이며 최적화 과정에서 내부 구조물과 간섭하지 않도록 $\pm 20mm$ 의 범위에서 해석을 수행하였다. CATIA V5 Product engineering optimizer 기능을 사용하여 테이블 지지대의 변형량이 최소가 되는 위치를 구하였으며 Table 2는 최적화 설계 결과를 나타낸다.

Table 2 The result by optimization

| | Initial model | Optimal shape model |
|-------------------------|---------------|---------------------|
| Φ_1 | 100 | 119.56 |
| Φ_2 | 40 | 42.06 |
| Deformation [μm] | 2.63 | 2.18 |
| Stress [MPa] | 1.22 | 1.16 |

Fig. 12는 최적 설계된 테이블의 구조해석 결과를 나타낸다. 테이블 바닥면의 받침대 부분을 고정하였으며 테이블 전체에 대해 2,000N의 하중을 적용하였다.

테이블의 최적화 설계 해석 결과 Φ_1, Φ_2 는 각각 내부 구조물과 간섭하지 않는 범위 내에서 19.56mm, 2.06mm로 지름이 증가하였다. 최대 변형량은 2.63 μm 에서 2.18 μm 로 17.1% 감소하였으며 최대 응력은 1.22MPa에서 1.16MPa로 4% 감소하였다.

4.2 A 축 인덱스 바디의 최적설계

톨팅 인덱스 테이블은 공작기계에 설치되는 위치 제약으로 인해 소형화, 경량화가 요구된다. 경

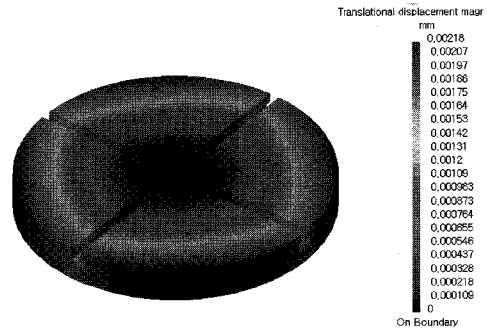


Fig. 12(a) Deformation distribution of the optimized table

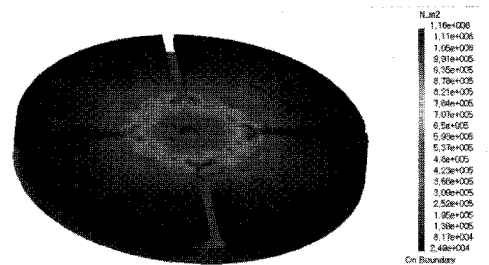


Fig. 12(b) Stress distribution of the optimized table

량화는 소재비용과 원가절감 측면에서 큰 비중을 차지하며, 경량화된 구조 채택으로 경제성을 향상시킨다. 구조적 성능을 만족하면서 중량을 감소시킬 수 있다면, 경량화가 요구되는 톨팅 인덱스 테이블에 있어 매우 유용하다.

A 축 인덱스 바디의 중량은 187.06kg으로 톨팅 인덱스 테이블 전체 중량의 40.2%를 차지한다. A 축 인덱스 바디의 중량 감소를 위해 ANSYS Workbench shape optimization 기능을 이용하여 A 축 인덱스 바디의 중량이 최소가 되는 최적 형상 해석을 수행하였다. 최적설계를 위해 다음과 같은 정식화를 이용하였다.

Find X
 Minimize Weight (X)
 Subject to $\sigma \leq \sigma_{all}$
 $\delta \leq \delta_{all}$
 $t_1 \leq t_1, t_2 \leq t_U$
 $X=[t_1, t_2]$

Fig. 13은 인덱스 바디의 설계 변수를 나타낸다.

t_1, t_2 는 설계 변수로 A 축 인덱스 바디에서 DD 모터와 조립이 되는 상부를 제외한 중량감소가 가능한 하부의 중량감소 부위 치수를 나타낸다. 중

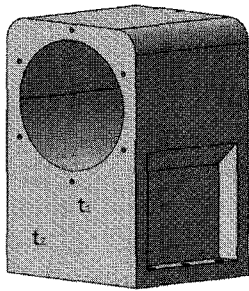
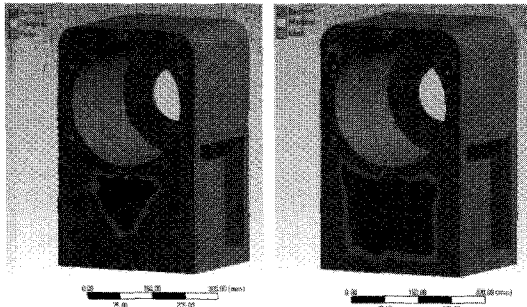


Fig. 13 Design variables of the index body

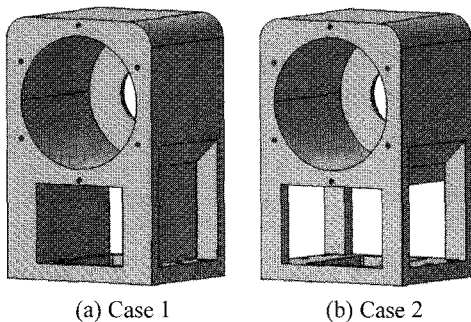
량을 목적함수로 설정 후 10%와 50%의 중량 감소 해석을 수행하였다.

Fig. 14 는 A 축 인덱스 바디의 최적 형상 해석 결과를 나타낸다. 중량 감소를 10%에서 50%로 증가 시킬수록 테이블 하부로 제거 가능 부분이 넓어짐을 확인할 수 있다.



(a) 10%weight reduction (b) 50%weight reduction
Fig. 14 Result of shape optimization

최적 형상 해석 결과를 바탕으로 2 가지 형태의 A 축 인덱스 바디의 최적 형상을 제안하였다. A 축 인덱스 바디의 수정된 모델링을 Fig. 15 에 나타내었다.

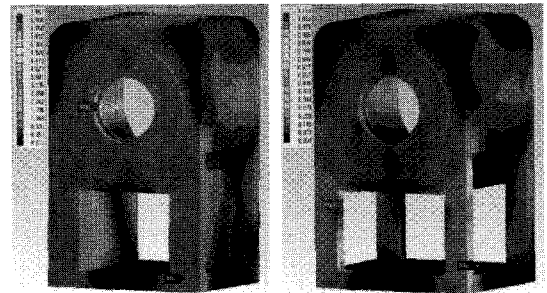


(a) Case 1 (b) Case 2
Fig. 15 Redesign model of the index body

최적 설계된 인덱스 바디의 구조해석을 수행하였다. 인덱스 바디의 바닥면을 고정하였으며 2,000N 의 하중을 적용하였다. 기존 설계된 인덱스 바디와 최적 설계된 인덱스 바디의 구조해석 결과는 Table 3 과 같다.

Table 3 The result by optimization

| Case | Initial model | [1] | [2] |
|---------------------------------------|---------------|------|------|
| Maximum deformation [μm] | 1.40 | 2.11 | 3.91 |
| Maximum Stress [MPa] | 0.71 | 0.86 | 1.12 |
| Weight [kgf] | 186 | 160 | 145 |



(a) Case 1 (b) Case 2
Fig. 16 Stress distribution of the index body

최대 변형과 최대 응력은 각각 3.91 μm , 1.12MPa 로 Case 2 에서 발생하였다. Case 2 의 중량은 기존 모델 186kg 에서 145kg 으로 22% 감소하였으며 인덱스 바디의 항복강도 270MPa 을 고려할 때 Case 2 는 구조적으로 안전함을 알 수 있다.

5. 최적형상을 적용한 유한요소해석

5.1 정적 구조해석

기존 해석모델과 동일한 경계조건을 적용하여 틸팅 인덱스 테이블의 정적 구조해석을 수행하였다. Fig. 17 과 Fig. 18 에서 최적화된 모델의 구조해석 결과를 보여주고 있다. 최적화된 테이블과 A 축 인덱스 바디를 적용시켜 해석을 수행한 결과 틸팅 인덱스 테이블의 중량은 초기 463kg 에서 422kg 으로 전체 8.9%의 중량이 감소하였다. 최대 응력은 5.76Mpa 에서 11.75MPa 로 5.99MPa 증가하였으며 기존 모델과 동일한 위치에서 발생했다. 최대 응력이 발생한 위치인 플레이트의 항복강도 230MPa

을 고려할 때 최대 응력에 대한 안전율은 19 로 최적화된 모델이 안전한 구조임을 알 수 있다. 초기모델과 최적화된 모델에 대한 결과를 Table 4 에 비교하였다.

Table 4 Initial model result and optimum result

| | Initial model | Optimal shape model |
|--------------------------------|---------------|---------------------|
| Maximum Deformation[μm] | 5.14 | 8.11 |
| Maximum Stress [MPa] | 5.76 | 11.75 |
| Weight [kgf] | 463 | 422 |

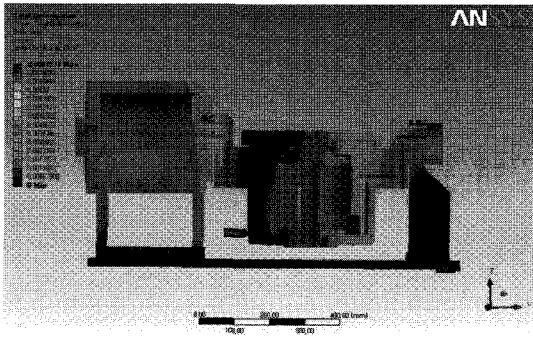


Fig. 17 Deformation distribution of the tilting index table

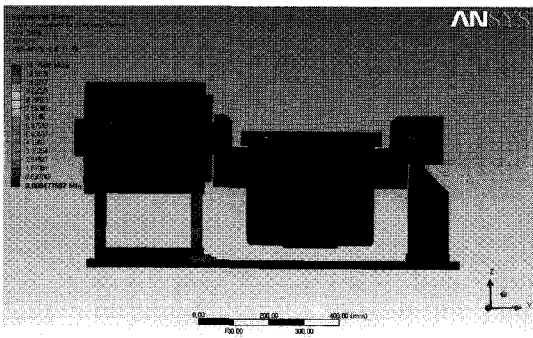


Fig. 18 Stress distribution of the tilting index table

5.2 모달 해석

틸팅 인덱스 테이블의 최적화된 형상에 대하여 모달 해석(Modal analysis)을 수행하였다. 고유진동수에 대한 해석 결과 전체 6 개의 모드를 추출하였다. 1 차 모드는 70.36Hz 로 A 축 인덱스 테이블이 앞뒤로 움직이는 모드형상을 확인하였다. Fig. 19 는 틸팅 인덱스 테이블의 각 모드별 진동수를 나타낸다.

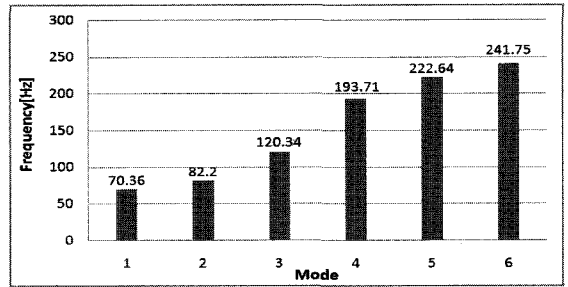


Fig. 19 Natural frequency of the tilting index table

틸팅 인덱스 테이블의 최고 회전능력은 250rpm 으로 여기서 발생하는 주파수는 4.17Hz 이다. 1 차 모드의 진동수인 70.36Hz 보다 상당히 낮은 영역에서 작동하므로 최적화된 모델은 진동으로부터 안전한 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 DD 모터 방식을 적용한 틸팅 인덱스 테이블의 구조해석을 실시하고 구조물의 형상 최적화를 수행하였다. 최적화된 형상에 대한 구조해석을 실시하였으며 해석 결과를 기존 모델과 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 자중과 하중에 의한 정적 구조해석 결과 틸팅 인덱스 테이블의 최대 변형량과 최대 응력 모두 허용 범위 이내로 안정적인 구조임을 확인하였다.
- 2) 테이블의 변형량 감소를 위해 테이블 지지대의 최적 설계를 수행하여 초기 모델보다 17.1% 변형량을 줄인 모델을 얻었다.
- 3) 틸팅 인덱스 테이블의 중량감소를 위해 가장 큰 비중을 차지하고 있는 인덱스 바디에 대해 최적 설계를 수행한 결과 초기 모델보다 22% 감량된 모델을 얻었다.
- 4) 최적 설계된 모델을 틸팅 인덱스 테이블에 적용하여 구조해석 수행결과 전체 중량은 8.9% 감량되었으며 최대 응력에 대한 안전율은 19 로 구조적으로 안정적이다. 1 차 고유진동수는 70.36Hz 로 진동으로부터 안전한 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 지식경제부 지역전략기획 기술개발 사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Choi, U. D., "High Precision CNC Index Table Development," Sung Rim Co. Ltd., pp. 1-9, 2001.
2. Choi, H. J., "Development of High-Speed and Intelligent Machine Tools Used for Cutting Mold." Daegu Machinery Institute of Components & Materials, pp. 10-12, 2008.
3. Moaveni, S., "Finite Elements Analysis," Scitech, pp. 775-781, 2003.
4. Lee, S. S., Hwang, Y. J. and Kim, H. J., "CATIA V5 release 14," Gyeongsang National University Press, pp. 12-13, 2005.
5. Yi, J. W., Park, J. S., Lee, K. H. and Park, G. J., "Development of and Optimization Algorithm Using Orthogonal Arrays in Discrete Space," Trans. of KSME(A), Vol. 25, No. 10, pp. 1621-1626, 2001.
6. Arora, J. S., "Introduction to Optimum Design," McGraw-Hill, pp. 8-9, 2003.
7. Vanderplaats, G. N., "Structural Design Optimization Status and Direction," Journal of Aircraft, Vol. 36, No. 1, pp. 11-20, 1999.
8. Lee, S. C. and Kang, S. Y., "Structural Analysis and Optimal Design of Eddy Current Brake Frame," Journal of KSPE, Vol. 21, No. 5, pp. 106-113, 2004.
9. Lee, J. S., "A Study on the Optimum Shape of Rope Braken," Journal of KSMTE, Vol. 14, No. 1, pp. 101-107, 2005.
10. Lee, M. J., Jung, J. W., Lee, C. M. and Lee, T. H., "Evaluation of Foundation Design for Tilting Index Table," Proc. of KSMPE Spring Conference, pp. 77-80, 2009.
11. Jo, Y. J., Jeon, E. C. and Kang, J. H., "A Study on the Optimum Design of Independent Suspension Final Reduction Gear," Journal of KSMPE, Vol. 7, No. 4, 135-141, 2008.
12. Kim, H. S., Ahn, C. W., Choi, K. H. and Park, J. H., "Shape Optimization of a Bogie frame for the Reduction of its Weight," Journal of KSPE, Vol. 19, No. 9, pp. 186-192, 2002.